

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Pada bab 4 ini menjelaskan hasil pengukuran arus *starting* yang sudah dilakukan pada motor induksi 3 fasa di PT Krakatau Tirta Industri. Selain itu dilakukan perhitungan dan simulasi menggunakan Simulink matlab sebagai pembanding dari hasil pengukuran yang telah berlangsung.

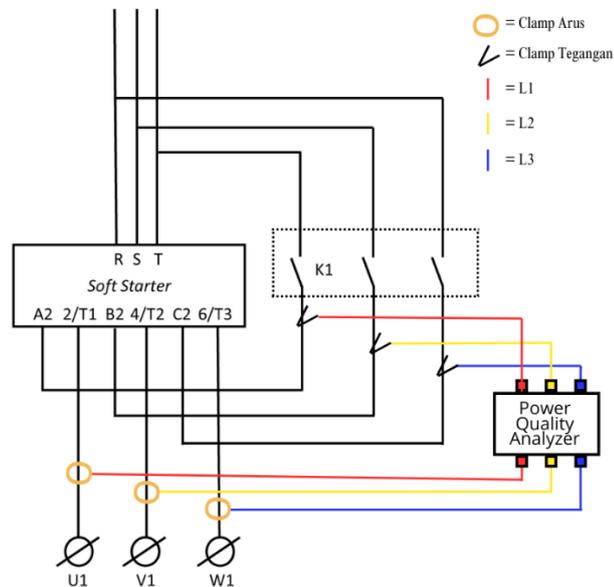
4.1. Hasil Pengukuran

Pada penelitian ini muncul dari ditemukannya ketidakseimbangan arus *starting* pada saat pengukuran motor berlangsung, oleh karena itu sebagai tindak lanjut hal tersebut dilakukanlah kajian atau penelitian ini untuk mengetahui hal-hal ataupun penyebab dari terjadinya ketidakseimbangan arus *starting* tersebut dengan harapan dapat menjadi salah satu upaya untuk dilakukannya pemeliharaan terhadap motor. Tabel 3.1 menunjukkan spesifikasi motor induksi tiga fasa yang digunakan operasional pompa air di PT. Krakatau Tirta Industri menggunakan daya 186 kW, dan arus nominal sebesar 336 A dan tegangan nominal sebesar 380 V. Dengan motor yang memiliki daya yang cukup besar ini, diharapkan lonjakan arus pada saat *starting* tidak dapat mengganggu operasional seperti adanya jatuh tegangan atau bahkan menyebabkan komponen-komponen listrik sekitar menjadi rusak.

Oleh karena itu pemilihan metode *starting* sangatlah penting guna menanggulangi hal tersebut sehingga pada motor 71M1 ini menggunakan metode *starting soft starter* yang berfungsi mereduksi arus *start* dengan cara mengatur tegangan masuk pada saat motor dinyalakan. Pada penelitian ini pengukuran arus *starting* dilakukan menggunakan alat bernama *Power Quality Analyzer* dari fluke. Dimana pada saat pengukuran berlangsung *Power Quality Analyzer* diatur pada mode motor *analyzer* yang dimaksudkan untuk pengukuran pada motor, dimana parameter yang terukur berupa tegangan, arus, frekuensi, dan kecepatan motor. Adapun pengaturan pada *Power Quality Analyzer* seperti berikut.

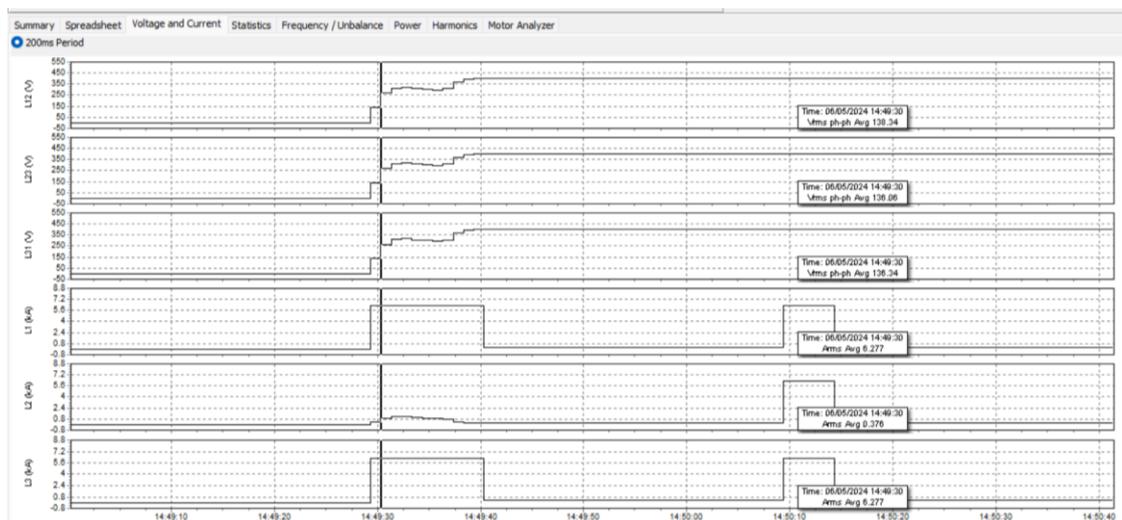
Selain itu pengambilan data pengukuran dilakukan dengan memperhatikan alat ukur tersambung dengan benar sesuai dengan panduan penggunaan alat

tersebut yaitu dengan memperhatikan arah *clamp* tersebut. Kemudian Teknik ataupun cara pengambilan data tertampil pada gambar berikut.



Gambar 4.1 Cara pengambilan data.

Teknik pengambilan data pada *power quality analyzer* dilakukan dengan menggunakan komponen tambahan yaitu *clamp* arus dan juga tegangan. Dapat dilihat pada gambar 4.2 *clamp* tegangan dipasang pada *output* kontaktor K1 sedangkan *clamp* arus dipasang pada *output soft starter* pada masing-masing fasa sesuai dengan petunjuk penggunaan pada buku manual *power quality analyzer fluke*. Sehingga dari teknik pengambilan tersebut didapatkan data arus *starting* seperti berikut ini.



Gambar 4.2 Grafik Tegangan dan Arus.

Pada gambar 4.3 hasil pengukuran memperlihatkan bahwa lonjakan arus sangatlah tinggi yaitu sekitar 6,277 A, selain terdapat perbedaan dalam bentuk grafik atau pola kenaikan arus saat proses *starting* terjadi. Pada fasa R dan T, terlihat bahwa gelombang arus menunjukkan karakteristik yang relatif stabil dan konstan, dimana peningkatan arus berlangsung tanpa perubahan yang signifikan dalam bentuk gelombangnya. Ini mengindikasikan bahwa arus pada kedua fasa tersebut mengalami kenaikan yang sama dan konsisten sepanjang waktu dengan nilai arus sebesar 6,277 A.

Sedangkan keadaan yang berbeda terlihat pada fasa S, dimana pada fasa ini kenaikan arus tidak mengikuti pola yang sama dengan fasa R dan T. Sebaliknya, arus pada fasa S meningkat secara bertahap, dengan perubahan yang lebih lambat dan bertingkat dalam nilai arusnya. Gelombang arus pada fasa S menunjukkan bahwa proses kenaikan arus tidak berlangsung secara *instan* atau konstan, tetapi lebih perlahan dan bervariasi, menghasilkan nilai arus yang berbeda dibandingkan dengan kedua fasa lainnya dengan nilai arus tertinggi sebesar 1,152 A.

Perbedaan dalam bentuk gelombang dan pola kenaikan arus ini mungkin menunjukkan adanya variasi dalam karakteristik beban yang terhubung pada fasa-fasa tersebut atau bisa juga disebabkan oleh perbedaan dalam kondisi sirkuit atau komponen yang terlibat dalam proses *starting*. Ini adalah indikasi penting yang memerlukan perhatian lebih lanjut untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi distribusi arus pada masing-masing fasa, yang pada akhirnya dapat berdampak pada kinerja keseluruhan sistem. Adapun nilai arus *starting* pada masing-masing fasa tersebut seperti pada tabel berikut ini.

Tabel 4.1 Data Kenaikan Arus *Starting* Motor 71M1 Terhadap Waktu.

Time	Tegangan (V)			Arus (A)		
	R	S	T	R	S	T
14:49:29	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14:49:30	138,3	136,0	136,3	6,277	0,376	6,277
14:49:31	270,4	267,5	266,2	6,277	0,923	6,277
14:49:32	313,7	311,4	309,2	6,277	1,152	6,277
14:49:33	321	319,1	316,6	6,277	1,137	6,277
14:49:34	309,7	307,6	305,4	6,277	1,022	6,277
14:49:35	304,1	302,2	300,1	6,277	0,952	6,277
14:49:36	298,3	296,5	294,6	6,277	0,853	6,277

Time	Tegangan (V)			Arus (A)		
	R	S	T	R	S	T
14:49:37	310,2	308,9	307,3	6,277	0,752	6,277
14:49:38	367,8	367,8	366,4	6,277	0,341	6,277
14:49:39	392,8	393,6	392,2	6,277	0,315	6,277
14:49:40	400,8	402	400,6	6,277	0,304	6,277
14:49:41	400,8	401,9	400,6	0,294	0,304	0,304
14:49:42	400,8	401,9	400,6	0,294	0,304	0,304

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel 4.1 di atas, dapat diamati bahwa total durasi proses *starting* berlangsung selama 10 detik sejak motor mulai diaktifkan. Dalam periode ini, terjadi beberapa proses penting yang berkaitan dengan perilaku arus *starting* pada masing-masing fasa motor. Pada fasa R dan T nilai arus *starting* yang tercatat cenderung sama yaitu sebesar 6,277 A. Kesamaan ini menandakan adanya kestabilan dalam peningkatan arus pada kedua fasa tersebut selama proses *starting* berlangsung.

Stabilitas arus ini penting karena mencerminkan kinerja yang optimal dalam pembagian beban pada motor, sehingga menghindari adanya ketidakseimbangan yang bisa berakibat negatif, seperti panas berlebih atau kerusakan komponen. Dengan nilai arus yang konsisten pada fasa R dan T, dapat dipastikan bahwa motor bekerja dengan efisiensi yang baik selama tahap awal penyalaan, menghindari lonjakan arus yang berlebihan yang dapat menyebabkan gangguan operasional atau kerusakan pada sistem kelistrikan.

Selain itu, kestabilan arus *starting* pada kedua fasa ini menunjukkan desain sistem kelistrikan yang baik, dimana arus yang masuk pada saat *starting* terdistribusi secara merata. Distribusi arus yang merata tersebut membantu mengurangi kemungkinan terjadinya lonjakan arus yang tidak diinginkan. Lonjakan tersebut bisa menyebabkan pemborosan energi dan bahkan merusak komponen motor jika terjadi secara terus-menerus. Oleh karena itu, pengamatan terhadap arus *starting* ini sangat penting dalam memastikan keandalan dan performa motor secara keseluruhan, khususnya dalam fase-fase awal pengoperasian yang sering kali menjadi titik kritis bagi motor listrik.

Sedangkan pada fasa S menunjukkan pola yang berbeda dibandingkan dengan fasa R dan T. Jika pada kedua fasa sebelumnya nilai arus *starting* terlihat stabil dan konsisten, maka pada fasa S terlihat arusnya justru tidak menunjukkan kestabilan yang sama. Nilai arus *starting* pada fasa S tampak bervariasi sepanjang durasi *starting*, tidak mengikuti pola yang seragam seperti yang terlihat pada fasa lainnya. Arus tertinggi pada fasa S tercatat terjadi pada detik ketiga, di mana nilai arus mencapai puncak sebesar 1,152 A. Setelah mencapai puncaknya, arus pada fasa S mulai menunjukkan *tren* penurunan yang bertahap, perlahan-lahan menurun seiring berjalannya waktu. Penurunan ini terus berlangsung hingga akhirnya arus pada ketiga fasa termasuk fasa S, mulai kembali stabil dan seragam pada tahap akhir proses *starting*.

Hal ini bisa diindikasikan adanya fluktuasi beban atau variasi dalam kondisi motor yang mungkin mempengaruhi distribusi arus pada fasa S. Ketidakseimbangan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti perubahan mendadak dalam tegangan yang sering disebut tegangan jatuh atau adanya hambatan yang lebih tinggi di sepanjang jalur fasa S. Namun setelah fase awal yang bervariasi tersebut arus pada fasa S berhasil menyesuaikan dan mencapai stabilitas, yang berarti motor mampu mengatasi fluktuasi awal dan beroperasi dengan efisien setelahnya. Hal ini juga ditunjukkan dengan melakukan pemantauan arus pada setiap fasa, karena hal yang tidak konsisten atau lonjakan arus yang terlalu tinggi bisa menandakan potensi masalah yang perlu diperhatikan. Secara keseluruhan, pola yang berbeda pada fasa S memberikan dampak lebih lanjut mengenai karakteristik operasional motor selama proses *starting*, yang dapat menjadi acuan penting dalam melakukan penyesuaian atau perbaikan sistem untuk meningkatkan kestabilan dan efisiensi operasional motor di masa mendatang.

Perbedaan pola arus *starting* yang terjadi antara fasa R, T, dan S ini menjadi dasar bagi penulis untuk melakukan kajian lebih mendalam. Tujuan dari kajian ini adalah untuk mengidentifikasi dan memahami penyebab yang mungkin menyebabkan variasi tersebut. Dengan mengetahui faktor-faktor yang berkontribusi terhadap perbedaan arus *starting* ini, diharapkan dapat diambil langkah-langkah preventif atau tindakan pemeliharaan yang lebih tepat terhadap motor induksi tiga fasa yang digunakan. Langkah-langkah ini penting untuk

memastikan bahwa motor dapat beroperasi dengan efisien dan meminimalkan risiko gangguan atau kerusakan yang mungkin terjadi di masa mendatang.

4.2. Hasil Perhitungan

Berdasarkan hasil pengukuran bahwa tegangan cenderung seimbang antar fasanya namun terkadang ketidakseimbangan tegangan pada sistem juga dapat mempengaruhi ketidakseimbangan arus motor induksi, oleh karena itu untuk membuktikan bahwa ketidakseimbangan hal tersebut dilakukan perhitungan sebagaimana merujuk pada persamaan 2.6 NEMA bahwa:

$$LVUR = \frac{\text{Besaran Deviasi Tegangan dari fasa} - \text{fasa}}{\text{Tegangan rata - rata fasa}} \times 100\%$$

Untuk mengetahui besar persentase ketidakseimbangan tegangan, dilakukan perhitungan sebagai berikut dengan referensi tegangan nominal pada nameplate motor 71M1.

Diketahui: R = 380 V, S = 420 V, dan T = 400 V

Maka:

- a. Menghitung tegangan rata-rata

$$V_{avg} = \frac{V_R + V_S + V_T}{3}$$

$$V_{avg} = \frac{380 + 420 + 400}{3} = \frac{1200}{3} = 400 \text{ V}$$

- b. Menghitung deviasi rata-rata dari setiap fasa

$$\Delta V_R = V_R - V_{avg} = 380 - 400 = 20 \text{ V}$$

$$\Delta V_S = V_S - V_{avg} = 420 - 400 = 20 \text{ V}$$

$$\Delta V_T = V_T - V_{avg} = 400 - 400 = 0 \text{ V}$$

- c. Menghitung deviasi maksimum

$$\Delta V_{Max} = \text{Max}(\Delta V_R \Delta V_S \Delta V_T) = \text{Max}(20, 20, 0) = 20 \text{ V}$$

- d. Menghitung ketidakseimbangan tegangan

$$LVUR = \frac{\text{Besaran Deviasi Tegangan dari fasa} - \text{fasa}}{\text{Tegangan rata - rata fasa}} \times 100\%$$

$$LVUR = \frac{20}{400} \times 100\% = 5\%$$

Penentuan arus *start* motor induksi untuk dapat dihitung berdasarkan data yang tertera pada *nameplate* motor dengan melihat *code letter* sehingga dapat dilakukan perhitungan sesuai dengan persamaan 2.7 dengan merujuk pada tabel standar dari NEMA yang tertera pada tabel 2.2. Untuk perhitungan arus didasari dari daya semu motor, menurut NEMA *code letter* H adalah 7,10 kVA/HP sehingga:

$$S_{start} = HP \times \text{code letter}$$

$$S_{start} = 250 \times 7.1$$

$$S_{start} = 1,775 \text{ kVA}$$

Dari hasil perhitungan daya semu kemudian kita dapat mencari arus *start* dengan persamaan 2.5 seperti berikut.

$$I_{start} = \frac{S_{start}}{3 \times V_{fasa}}$$

$$I_{start} = \frac{1,775 \text{ kVA}}{3 \times 380} = 1,557 \text{ A}$$

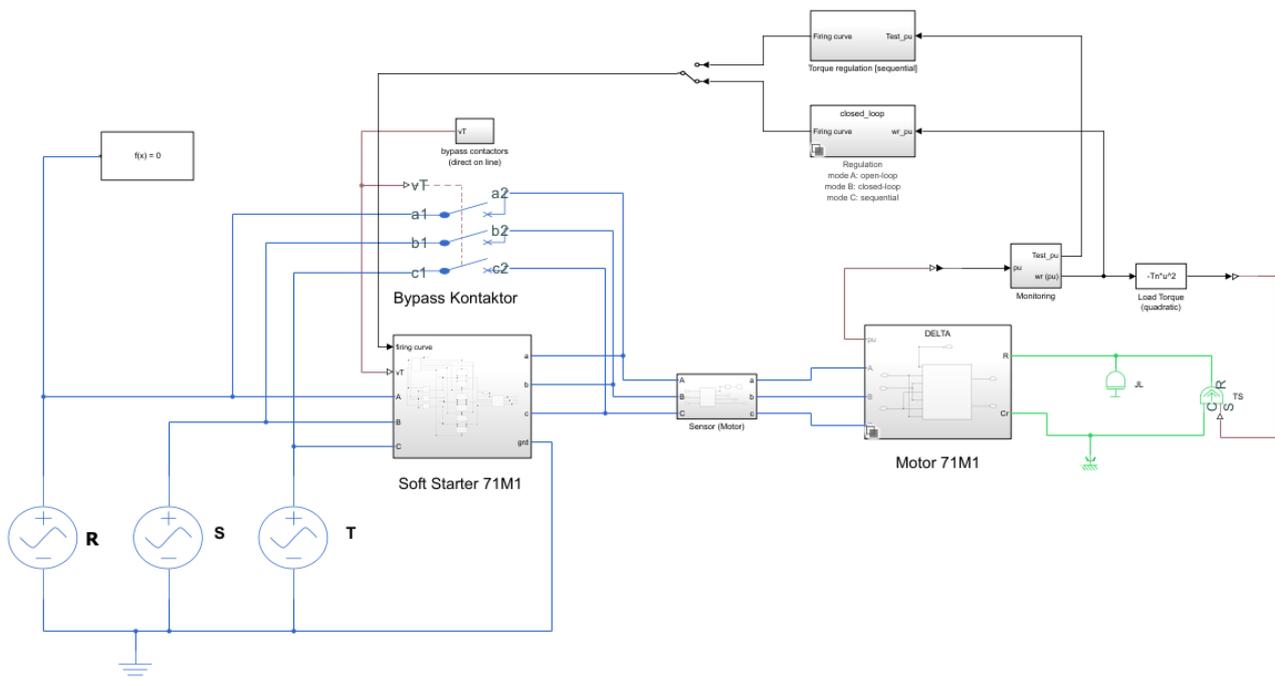
Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa arus *starting* motor 71M1 mencapai angka sebesar 1,557. Sementara itu, arus nominal yang dihasilkan oleh motor tersebut adalah sekitar 336 A. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa nilai arus *starting* yang terukur ini adalah sekitar 5 kali lipat lebih besar daripada arus nominalnya. Perbandingan yang signifikan antara arus *starting* dan arus nominal ini menunjukkan karakteristik dari motor 71M1, dimana saat motor baru dinyalakan arus yang mengalir cenderung jauh lebih tinggi dibandingkan saat motor beroperasi secara normal. Hal ini terjadi karena pada saat motor pertama kali mulai berputar, dibutuhkan energi tambahan untuk mengatasi inersia awal dan memberikan torsi yang cukup untuk mencapai kecepatan operasi yang diinginkan.

Meskipun kondisi ini tergolong normal untuk motor induksi, perbedaan besar antara arus *starting* dan arus nominal juga dapat menjadi indikator penting yang perlu diperhatikan. Kenaikan arus yang sangat tinggi dalam waktu singkat dapat menyebabkan lonjakan beban listrik pada sistem dan, jika tidak diantisipasi dengan baik bisa menyebabkan lonjakan panas atau bahkan kerusakan pada komponen motor maupun rangkaian listrik yang terhubung. Oleh karena itu, sangat penting untuk memastikan bahwa sistem kelistrikan di sekitar motor mampu

menahan arus *starting* yang lebih tinggi tanpa mengalami gangguan. Selain itu, perbedaan antara arus *starting* dan arus nominal ini juga penting dalam pemilihan perangkat perlindungan, seperti circuit breaker dan relay, yang harus mampu mengatasi arus tinggi saat proses *starting* tanpa memutuskan arus secara tidak sengaja. Oleh karena itu, perhitungan seperti ini tidak hanya membantu dalam memahami performa motor tetapi juga dalam memastikan keamanan dan efisiensi dari seluruh sistem kelistrikan.

4.3. Hasil Simulasi Simulink Matlab

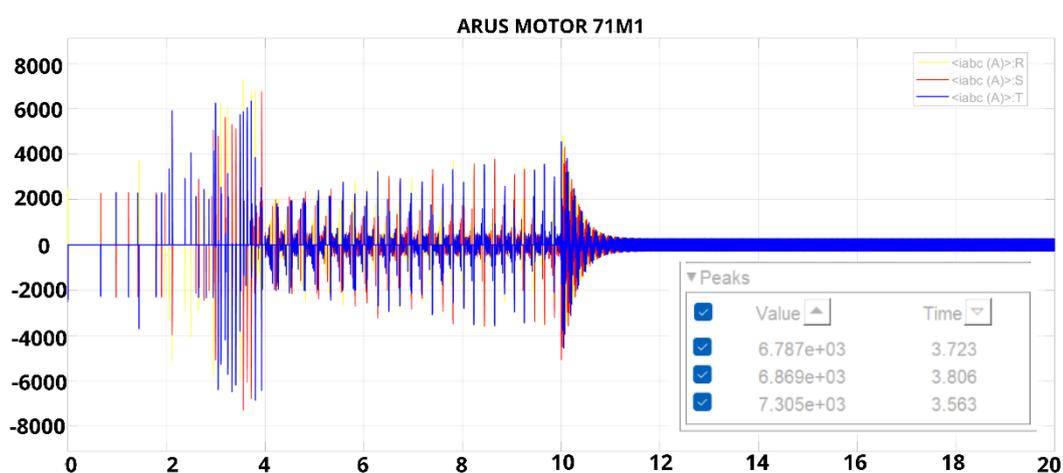
Salah satu cara yang telah dilakukan selain mengkaji lewat literatur maupun terjun langsung pada dunia industri, penulis mencoba melakukan identifikasi penyebab ketidakseimbangan arus *starting* dengan cara simulasi menggunakan SIMULINK MATLAB sebagai berikut:



Gambar 4.3 Rangkaian *Soft Starter* Simulink Matlab.

Rangkaian simulasi motor 71M1 dengan metode *soft starter* pada Simulink MATLAB terdapat komponen SCR thyristor anti-paralel pada masing-masing fasa. Fungsi dari SCR ini adalah untuk mengontrol tegangan motor selama proses *starting*, hal tersebut berfungsi agar *starting* motor lebih halus dan mengurangi lonjakan arus yang sering terjadi saat penyalaan awal. Dengan demikian, motor

dapat bekerja lebih efisien dan dengan masa pakai yang lebih lama. Pada Gambar 4.4 dapat dilihat beberapa komponen utama yang membentuk rangkaian simulasi. Komponen tersebut meliputi *supply* sebagai sumber tegangan *input*, *soft starter* yang berperan sebagai pengendali utama untuk mengatur arus dan tegangan selama proses *starting*, serta *bypass kontaktor* yang mengalihkan arus langsung ke motor setelah motor mencapai kecepatan stabil. Ketika motor sudah beroperasi secara normal, *bypass kontaktor* memastikan motor terhubung langsung ke sumber daya untuk efisiensi yang lebih baik. Semua parameter komponen dalam rangkaian telah diatur sesuai dengan spesifikasi yang digunakan di PT. Krakatau Tirta Industri, seperti yang tercantum pada Tabel 3.1. Pengaturan ini memungkinkan simulasi untuk merepresentasikan kondisi nyata, memberikan gambaran akurat tentang performa motor di lapangan dan membantu dalam pengujian berbagai kondisi operasional yang mungkin terjadi.



Gambar 4.4 Grafik Arus *Starting* 71M1.

Dengan mengatur parameter-parameter yang ada, hasil simulasi menunjukkan grafik arus pada Gambar 4.5. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa kenaikan arus *starting* mencapai nilai tertinggi sebesar 7,305 A. Setelah mencapai puncaknya, arus mulai menurun secara bertahap, yang berarti proses transisi dari kondisi awal *starting* ke tahap berikutnya. Penurunan ini menunjukkan bahwa motor sedang beradaptasi dan mengurangi beban awalnya setelah memberikan torsi yang cukup untuk mulai beroperasi. Jika diperhatikan lebih lanjut, terdapat kenaikan arus kembali pada detik ke-10, hingga akhirnya arus tersebut mencapai

nilai nominalnya. Fenomena ini terjadi karena adanya pengalihan sistem oleh *bypass* kontaktor. *Bypass* kontaktor bekerja dengan menghubungkan motor langsung ke sumber daya utama setelah motor mencapai kondisi stabil, sehingga arus yang mengalir ke motor menjadi lebih konstan. Proses ini memastikan motor beroperasi dengan efisiensi optimal, mengurangi fluktuasi arus, dan menjaga performa sistem kelistrikan secara keseluruhan.

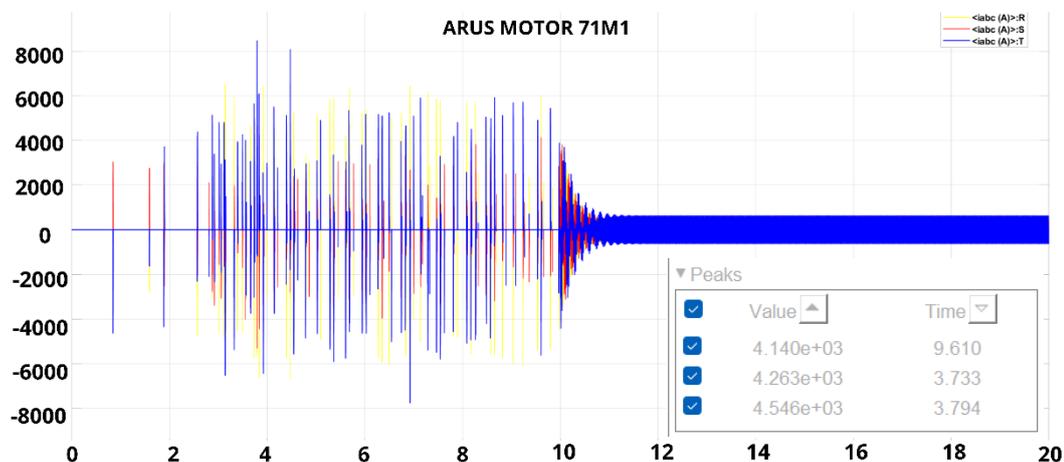
4.4. Analisa Hasil

Analisa hasil arus *starting* ini dilakukan dengan cara melakukan perbandingan dari metode-metode yang telah dilakukan dengan pengukuran, perhitungan dan simulasi. Dari pengukuran, perhitungan serta simulasi yang telah dilakukan pada Simulink matlab didapatkan nilai arus *starting* hasil yang berbeda dari masing-masing metode, dimana pada saat pengukuran arus terukur sebesar 6,277 A, kemudian pada saat perhitungan arus yang dihasilkan sebesar 1,557 A sedangkan hasil simulasi menunjukkan arus sebesar 7,305 A. Pada saat pengukuran berlangsung motor sedang digunakan untuk *mensupply* air kepada pelanggan sehingga arus terukur sangatlah besar karena motor sedang dalam kondisi berbeban. Akan tetapi pada perhitungan hasil yang didapatkan arus *starting* yang lebih kecil yaitu 8 kali lipat lebih tinggi dibandingkan arus nominalnya yang mana hal tersebut mendekati teori *Locked Rotor Current* (LRC). Sedangkan untuk mendapatkan hasil perbandingan yang signifikan dilakukanlah simulasi menggunakan Simulink matlab dengan tetap memperhatikan parameter-parameter komponen yang ada, akan tetapi hasil simulasi tidak luput dengan adanya *default library* yang tersedia pada aplikasi tersebut yang mana dari hal tersebut dapat mempengaruhi hasil.

4.4.1. Dampak Ketidakseimbangan Tegangan Terhadap Arus *Starting*

Salah satu faktor penyebab ketidakseimbangan arus tidak luput dari adanya ketidakseimbangan tegangan sumber. Menurut NEMA ketidakseimbangan tegangan operasi aman motor induksi berada 1-3%, apabila melebihi dari batas wajar yang dianjurkan oleh NEMA maka motor akan mengalami kerusakan ataupun dapat mempengaruhi usia pakai motor induksi. Oleh karena itu penulis mencoba mensimulasikan bentuk ketidakseimbangan tegangan sesuai dengan

perhitungan yang telah dilakukan sesuai dengan persamaan 2.6 yaitu 5% dengan nilai fasa R = 380 V, fasa S = 420 V dan fasa T = 400 V untuk membuktikan bahwa ketidakseimbangan tegangan dapat mempengaruhi ketidakseimbangan arus pada motor 71M1 dan berikut hasil simulasi pada SIMULINK MATLAB.



Gambar 4.5 Pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap arus.

Dari tabel 4.6 dapat dilihat bahwa hasil ketidakseimbangan tegangan mempengaruhi arus motor induksi. Dimana hasil menunjukkan ketidakseimbangan dapat dilihat pada grafik bahwa fasa S (merah) cenderung lebih rendah dengan nilai tertinggi sebesar 4,546 A dibandingkan dengan fasa lainnya yaitu pada fasa R (kuning) menunjukkan *trent* tertinggi mencapai nilai lebih dari 6,000 A dan fasa T (biru) menunjukkan *trent* tertinggi mencapai nilai lebih dari 8,000 A.

Selain itu dari hasil perbandingan terlihat bahwa pada saat dilakukan metode perhitungan arus *starting* lebih kecil dibandingkan dengan pengukuran dan simulasi, hal tersebut terjadi karena perhitungan tersebut menggunakan parameter motor yang tidak terbebani selain itu impedansi pada motor juga perlu diperhatikan karena salah satu faktor yang mempengaruhi lonjakan arus dapat berupa impedansi dari motor maupun komponen yang terhubung pada motor itu sendiri. Oleh karena itu dilakukanlah simulasi yang harapannya dapat menggambarkan kondisi aslinya dengan memperhatikan parameter-parameter sistem yang ada.

Pada hasil pengukuran pada gambar 4.3 terlihat bahwa *trend* atau grafik pada fasa S berbeda dengan fasa R dan T, dimana pada fasa ini terlihat kenaikan arus secara bertahap dan terkonfirmasi kenaikan arus tersebut pada tabel 4.1. Beberapa faktor yang dapat menyebabkan arus *starting* tidak seimbang diantaranya

ketidakseimbangan tegangan *input*, kegagalan *switching* thyristor, perbedaan sudut penyalan thyristor dan impedansi motor yang kurang baik.

Dari faktor-faktor tersebut, faktor ketidakseimbangan tegangan *input* bukanlah penyebab utama dari ketidakseimbangan arus, karena dapat dilihat pada tabel 4.1 dimana tegangan *input* cenderung seragam antar fasanya. Disisi lain kegagalan *switching* thyristor dapat mungkin terjadi, kegagalan *switching* yang dimaksud adalah salah satu thyristor pada rangkaian tidak bekerja secara maksimal dimana tegangan tidak diredam secara maksimal untuk mengatur tegangan yang diberikan ke motor selama fase start. Thyristor ini dihidupkan dan dimatikan dalam *interval* waktu tertentu atau pada titik-titik tertentu dalam gelombang sinusoidal AC untuk mengurangi tegangan yang diterapkan ke motor, yang pada gilirannya mengurangi arus *start*. Proses *switching* ini tidak menghasilkan gelombang sinusoidal penuh pada awal start, melainkan gelombang yang terpotong-potong. Ini yang menyebabkan arus yang terukur pada fase R dan T berbentuk pulsa, karena arus hanya mengalir saat thyristor dalam kondisi *on*.

4.4.2. Dampak *Firing Angle* Terhadap Arus *Starting*

Soft starter mengendalikan sudut penyalan (*firing angle*) dari thyristor, yang menentukan kapan thyristor diaktifkan dalam setiap siklus AC. Pada awal *start*, *firing angle* ini cukup besar sehingga hanya sebagian kecil dari gelombang AC yang diizinkan mengalir, menghasilkan arus yang tampak seperti pulsa. Seiring dengan motor yang mulai berakselerasi, *firing angle* ini secara bertahap dikurangi, memungkinkan lebih banyak bagian dari gelombang AC yang diterapkan ke motor, hingga akhirnya menghasilkan gelombang sinusoidal penuh saat motor mencapai kecepatan penuh dan *bypass contactor* mengambil alih.

Penulis melakukan simulasi dengan mengubah sudut penyalan pada masing-masing fasa motor menggunakan Simulink MATLAB, berdasarkan berbagai faktor yang mempengaruhi performa *starting*. Pengaturan sudut penyalan thyristor ini bertujuan untuk mengontrol arus dan tegangan yang mengalir ke motor, sehingga lonjakan arus yang biasanya terjadi selama *starting* dapat diminimalisir. Dengan menyesuaikan sudut penyalan, motor diharapkan dapat mencapai kestabilan lebih cepat dan lebih efisien.

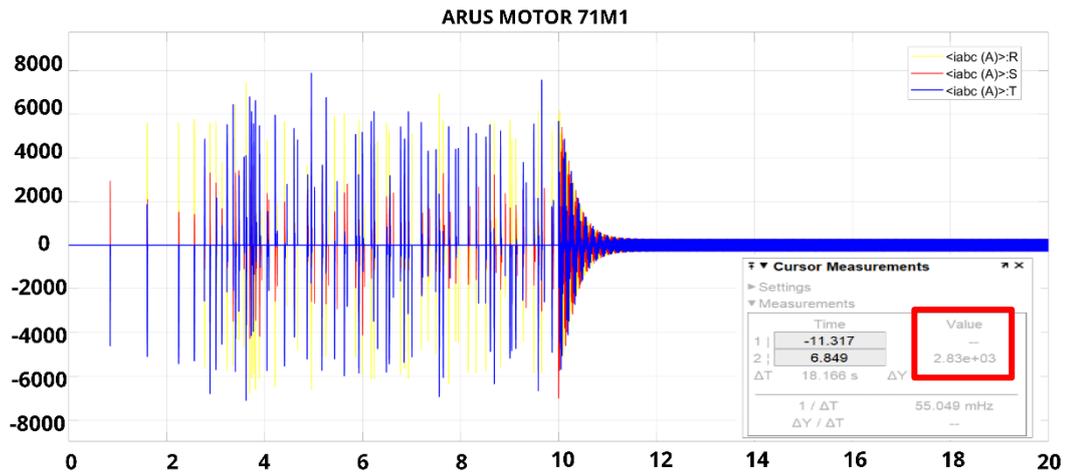
Pengaturan sudut yang berbeda antara fasa S dan fasa R serta T sesuai dengan gambar 3.5 memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja motor selama proses *starting*, di mana setiap sudut memiliki karakteristik yang berbeda dalam mengontrol arus dan tegangan yang dialirkan. Dengan demikian, pengaturan *firing angle* yang tepat menjadi salah satu pilihan untuk mencapai performa motor yang diinginkan. Adapun perhitungan yang digunakan untuk mengubah radian menjadi derajat dapat dilakukan dengan menggunakan rumus yang telah ditentukan, yaitu mengalikan nilai radian dengan faktor konversi yang sesuai dengan menggunakan persamaan 2.5 atau yang tertera pada tabel 2.1. Adapun perhitungan pengubahan radian menjadi derajat seperti berikut.

$$Sudut = radian \times \frac{180}{\pi}$$

$$Sudut = 0,5236 \times \frac{180}{3,14} = 30^\circ$$

Firing angle yang dimaksud merupakan sudut yang digunakan untuk mengontrol motor atau sistem daya AC dan berkaitan dengan pengaturan sudut dimana tegangan AC diterapkan ke beban, yang dalam hal ini adalah motor induksi. Pengaturan *firing angle* sangat penting karena secara langsung memengaruhi kinerja motor dalam hal efisiensi dan responsivitas terhadap sinyal kontrol yang diberikan. *Firing angle* ini menentukan kapan tegangan mulai diterapkan, sehingga mempengaruhi waktu dan proses dimana arus mengalir ke motor.

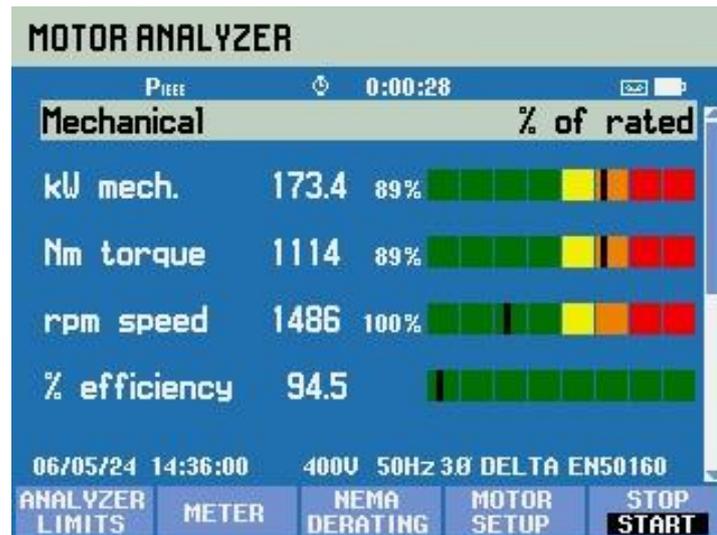
Semakin besar nilai *firing angle* yang diterapkan, maka semakin kecil arus yang dihasilkan pada motor. Hal ini disebabkan karena penundaan dalam penerapan tegangan menyebabkan berkurangnya waktu di mana arus dapat mengalir ke beban, sehingga mengurangi torsi yang dihasilkan oleh motor pada awal operasi. Sebaliknya, jika *firing angle* lebih kecil, arus yang dihasilkan akan semakin besar, memberikan lebih banyak torsi untuk memulai gerakan motor. Oleh karena itu, pemilihan *firing angle* yang tepat menjadi sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja motor, meminimalkan lonjakan arus, dan memastikan bahwa sistem beroperasi dalam kondisi yang paling efisien. Dengan memahami hubungan antara *firing angle* dan arus yang dihasilkan, diharapkan dapat merancang sistem kontrol yang lebih baik untuk aplikasi motor induksi yang dapat meningkatkan keandalan dan umur peralatan. Dari pengaturan *firing angle* pada masing-masing fasa tersebut didapatkan arus *starting* seperti berikut.



Gambar 4.6 Arus *starting* tidakseimbang.

Gambar 4.8 terlihat bahwa arus pada fasa S (merah) cenderung memiliki *trent* atau grafik yang lebih kecil dibandingkan fasa R dan T dengan nilai rata-rata sebesar 2,830 A. Dengan begitu *firing angle* pada setiap fasa dapat mempengaruhi arus *starting* pada motor induksi karena sudut tembak atau penyalaan bekerja dengan cara menahan tegangan untuk sampai menuju beban.

Ketidakseimbangan arus *starting* pada motor induksi dapat menyebabkan beberapa dampak yang cukup serius pada komponen kelistrikan termasuk motor induksi itu sendiri. Ketidakseimbangan arus dapat menyebabkan belitan stator menjadi panas, peningkatan getaran, tekanan mekanis, *overheating*, penurunan kualitas daya. Selain itu arus yang tidak seimbang dapat menyebabkan torsi beresilasi yang akan berdampak pada perubahan magnetisasi motor. Kemudian hubungan antara daya dan torsi yang berbanding lurus, motor dapat mengalami kenaikan daya dan torsi yang cukup signifikan sehingga dari hal-hal tersebut apabila dibiarkan dalam jangka waktu yang cukup lama akan menyebabkan kerusakan pada motor induksi. Dampak dari ketidakseimbangan arus *starting* pada motor 71M1 PT Krakatau Tirta Induksi menyebabkan motor memiliki vibrasi dan kebisingan yang cukup tinggi dibuktikan dengan hasil pengukuran yang tertangkap pada PQA berikut.



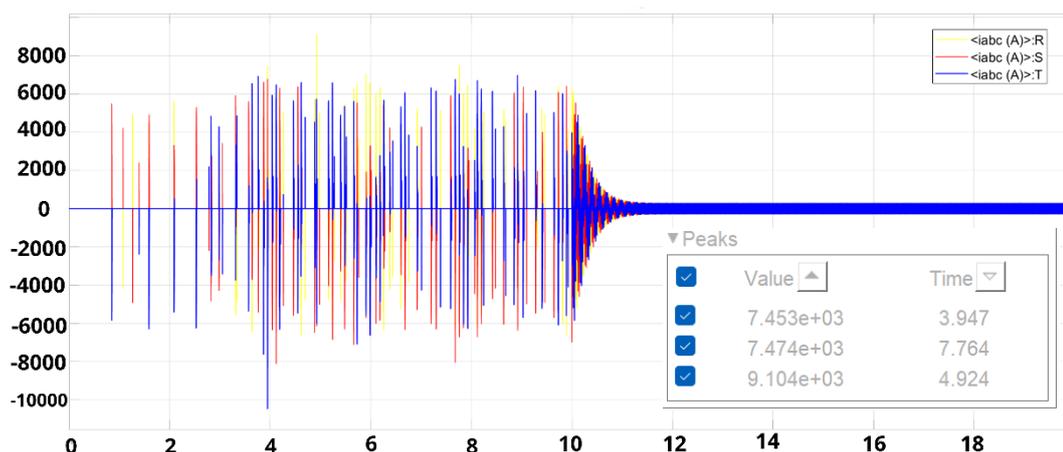
Gambar 4.7 Parameter Mekanis.

Tampilan parameter mekanis menunjukkan daya, torsi, dan kecepatan. indikator berwarna menunjukkan performa motor dibandingkan dengan ratingnya. Dapat dilihat pada gambar 4.9 bahwa peningkatan daya sebanding lurus dengan torsi motor dengan garis menunjukan bahwa keadaan berada pada warna *orange* (*serious*). Dari tampilan tersebut dapat diartikan bahwa kondisi motor cukup memprihatinkan yang berhubungan dengan usia pakai dari motor induksi itu sendiri sesuai dengan penjelasan pada gambar 2.6.

4.4.3. Dampak Resistansi Motor 71M1 Terhadap Arus *Starting*

Ketidakseimbang arus *starting* ataupun lonjakan arus dapat terjadi karena resistansi dan induktansi dari sebuah motor yang kurang baik, kurang baik yang dimaksud contohnya adalah kumparan yang memiliki resistansi dan induktansi yang kecil. Dimana resistansi dan induktansi dalam kumparan berfungsi sebagai hambatan terhadap arus listrik sehingga meminimalisir tingginya arus yang mengalir. Semakin kecil resistansi dan induktansi maka akan semakin besar arus yang mengalir sehingga dapat menyebabkan banyaknya energi yang hilang hingga motor mengalami panas berlebih yang dapat menyebabkan kerusakan. Motor induksi memiliki batas fisik yang harus diperhatikan dalam hal arus, sehingga desain resistansi dan induktansi menjadi hal yang sangat penting bagi umur motor induksi untuk menjaga keseimbangan performa dan keandalan motor.

Pada *nameplate* motor 71M1 tercatat bahwa tegangan nominal motor adalah sebesar 380 V, dengan kapasitas yang mencapai 186 kW, yang setara dengan sekitar 250 HP. Hal ini menunjukkan bahwa motor dirancang untuk beroperasi dalam sistem yang memiliki frekuensi sebesar 50 Hz. Dengan demikian pada parameter impedansi motor, nilai resistansi rotor dan stator telah diatur sesuai dengan spesifikasi teknis yang diperlukan. Dalam hal ini, nilai resistansi stator motor diatur dengan $\text{InductionMotor.Rs} = 0,02$ pu, yang merupakan nilai yang relatif rendah, sehingga memungkinkan arus listrik mengalir dengan efisien. Selain itu, nilai induktansi stator diatur dengan $\text{InductionMotor.Ls} = 0,00011$ pu, yang juga berkontribusi pada respons yang cepat terhadap perubahan arus. Untuk resistansi rotor nilainya ditetapkan pada $\text{InductionMotor.Rr} = 0,06$ pu dan induktansi rotor diatur menjadi $\text{InductionMotor.Lr} = 0,00014$ pu. Pengaturan parameter-parameter ini sangat penting untuk memastikan bahwa motor beroperasi dalam kondisi optimal, memberikan efisiensi yang tinggi dan meminimalkan kerugian energi selama proses operasionalnya. Dengan mengikuti spesifikasi *nameplate* ini, diharapkan motor 71M1 dapat berfungsi dengan baik dalam lingkungan industri yang ada sehingga dapat memenuhi kebutuhan operasional yang diperlukan dengan andal dan efisien. Dari parameter-parameter tersebut didapatkan bentuk grafik atau arus pada simulasi sebagai berikut.



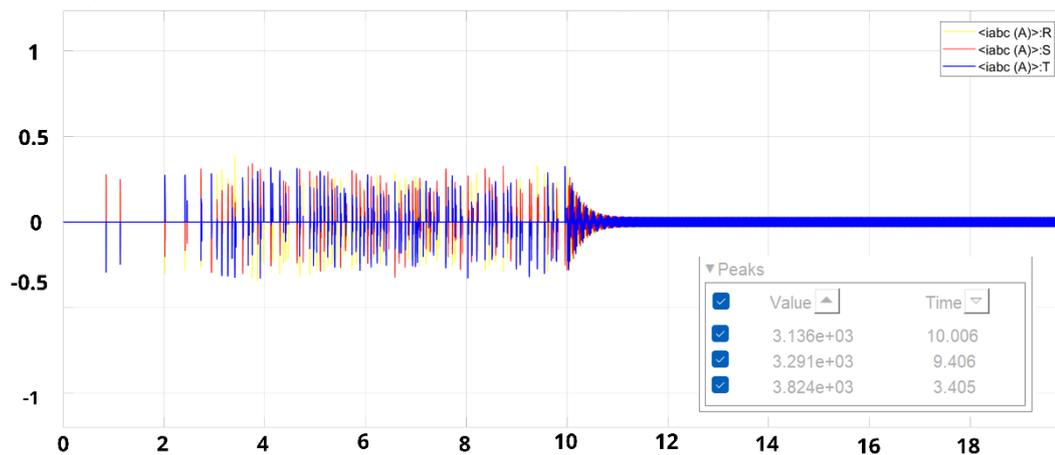
Gambar 4.8 Pengaturan Resistansi Rendah.

Dari pengaturan parameter resistansi rotor dan stator pada motor yang dianalisis melalui Simulink dapat dilihat pada Gambar 4.11 bahwa terjadi lonjakan arus yang sangat tinggi dengan nilai arus tertinggi yang tercatat mencapai 9,104 A.

Lonjakan arus yang signifikan ini menandakan adanya masalah dalam pengaturan parameter yang dapat berdampak pada efisiensi dan kinerja keseluruhan motor. Untuk mencoba membuktikan seberapa pentingnya pengaturan resistansi pada motor induksi dalam hal ini penulis mempertimbangkan untuk melakukan *rewinding* pada motor tersebut sebagai langkah perbaikan. Oleh karena itu, dilakukan perubahan nilai resistansi rotor dan stator pada Simulink MATLAB untuk mengamati bagaimana perubahan ini akan memengaruhi arus yang mengalir dan kinerja motor secara keseluruhan. Pengujian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai hubungan antara resistansi dan arus pada motor induksi, serta memberikan pendapat tentang bagaimana optimasi parameter ini dapat meningkatkan kinerja operasional motor di lapangan.

Dengan melakukan perubahan nilai resistansi stator dan rotor pada motor menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan pengaturan sebelumnya, dapat diperoleh parameter baru yang diharapkan dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap kinerja motor. Nilai resistansi stator kali ini diatur menjadi $\text{InductionMotor.Rs} = 0,04 \text{ pu}$ yang lebih besar dari nilai sebelumnya sehingga dapat mempengaruhi arus yang mengalir ke motor. Kemudian induktansi stator juga mengalami penyesuaian dengan nilai $\text{InductionMotor.Ls} = 0,00022 \text{ pu}$, yang memberikan dampak pada reaktansi motor dan dapat meningkatkan responsivitas motor terhadap fluktuasi beban.

Selain itu resistansi rotor diatur menjadi $\text{InductionMotor.Rr} = 0,12 \text{ pu}$, yang merupakan peningkatan signifikan dari nilai sebelumnya. Pengaturan ini bertujuan untuk mengoptimalkan performa motor dalam hal torsi dan efisiensi energi. Kemudian nilai induktansi rotor juga diubah menjadi $\text{InductionMotor.Lr} = 0,00024 \text{ pu}$, yang berperan sebagai pengendalian arus dan pengurangan kerugian energi selama operasi motor. Dengan parameter baru ini, diharapkan motor dapat beroperasi lebih efisien dalam kondisi tertentu, dan pengaruh dari peningkatan resistansi ini terhadap kinerja motor akan dievaluasi lebih lanjut melalui simulasi dan analisis data untuk mendapatkan wawasan yang lebih mendalam tentang dampak pengaturan resistansi yang lebih tinggi dalam sistem motor induksi. Didapatkan hasil grafik ataupun lonjakan arus *starting* pada Simulink matlab seperti berikut.



Gambar 4.9 Pengaturan Resistansi Tinggi.

Pada gambar 4.13 dapat terlihat bahwa grafik dan lonjakan arus *starting* lebih rendah dari sebelumnya dengan nilai arus tertinggi sebesar 3,824 A. Oleh karena itu pengaturan sangatlah berpengaruh terhadap lonjakan arus pada motor induksi karena cara kerjanya yang mampu menghambat arus yang mengalir pada sebuah sistem. Ada baiknya pengaturan parameter resistansi secara *actual* dapat dilakukan dengan menyesuaikan kapasitas motor yang digunakan agar sesuai dengan komponen lain sehingga nilai impedansi pada sebuah sistem dapat dikatakan baik.

Ketidakseimbangan arus *starting* yang muncul pada saat metode pengukuran dilakukan dapat diidentifikasi dengan melakukan perhitungan serta simulasi tersebut dengan memperhatikan faktor-faktor yang dapat menyebabkan arus ketidakseimbangan pada sebuah sistem dapat terjadi. Dari perhitungan serta simulasi pada Simulink matlab, adapun faktor yang memungkinkan menjadi penyebab tersebut adalah sudut penyalan atau *firing angle soft starter* yang mengatur kapan thyristor mengatur tegangan yang mengalir pada motor. Selain itu impedansi yang terdiri dari resistansi dan induktansi dari sebuah sistem perlu diperhatikan karena cara kerjanya yang dapat menghambat arus yang sangat tinggi yang dapat menyebabkan sebuah sistem mengalami *trip* atau bahkan motor induksi mengalami *overheating* hingga timbul kerusakan pada motor induksi.